ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202006.00028v1

1980—2017 年天山山区不同降水形态的时空变化①

田亚林[1,2,3]， 李雪梅[1,2,3]， 李　珍[4]， 秦琦瑞[1,2,3]

（1　兰州交通大学测绘与地理信息学院，甘肃　兰州　730070；
2　地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心，甘肃　兰州　730070；
3　甘肃省地理国情监测工程实验室，甘肃　兰州　730070；
4　中国科学院大气物理研究所中国科学院东亚区域气候—环境重点实验室，北京　100029）

摘　要：利用 1980—2017 年天山山区 35 个气象站点的逐日降水资料，分离出 3 种主要降水形态后，运用线性倾向估计、Mann-Kendall（M-K）突变检验、滑动 t 突变检验、Morlet 小波分析等方法研究了天山山区降水日数及降雨日数、降雪日数和雨夹雪日数的时空分布及变化规律。研究表明：(1) 在空间上，天山山区降水日数和降雨日数表现为"北多南少，西多东少"的分布格局，降雪日数"北多南少"明显；降水日数呈现"西快东慢，北快南慢"的增长趋势，西段增长幅度明显，降雨日数普遍增多，大部分地区降雪日数减少，雨夹雪日数也有减少趋势。(2) 近 38 a 来，天山山区降水日数表现为缓慢增长趋势，降雨日数显著增加，降雪日数减少，雨夹雪日数变化并不明显。(3) 天山山区降水日数突变年在 1986 年前后。(4) 降水日数、降雨日数、降雪日数及雨夹雪日数均存在明显的 10 a 左右的振荡周期，此外，降水日数、降雨日数和雨夹雪日数 18～22 a 周期波动也比较明显。

关 键 词：　天山山区；降水形态；时空分布

文章编号：

降水是最基本的气象要素之一，也是全球水循环中必不可少的重要因子。降水通过改变大气中水能、热量的再分布，不仅对天气气候产生重要影响，也影响着自然生态环境和社会经济活动[1-2]。不同形态的降水对陆地表面物质和能量循环产生的影响有很大的差异[3-5]。通常情况下，特定降水量的降水，若表现为降雨，则影响很小，但如果是降雪，则会给农业生产、城市交通通讯等带来严重影响[6]。

在全球气候变暖的背景下，西北地区由暖干转变为暖湿，其中，表现最为突出是新疆地区[7-8]，而天山作为南北疆气候的分水岭，其降水对新疆全境乃至我国中、西部地区的天气气候和生态环境具有重要意义[9]。目前对于天山山区降水的研究多集中在降水量方面。蓝永超等[10]研究发现近 50 a 来天山山区气温和降水均呈有明显的上升趋势。赵传成等[11]应用信息熵方法研究天山山区降水发现，该地区降水具有时间变异性和空间变异性特征。韩雪云等[12]对 1959—2009 年天山山区降水的时空分布特征进行了研究，指出该地区年降水量呈增加趋势，且西段的增加趋势小于中部和南部。张正勇等[13-14]对近 50 a 天山山区的降水量进行了时空变化趋势分析和突变特征研究，并通过建立 PLUS 模型，分析了天山山区降水量空间分布特点及成因，发现该地区年降水量表现出明显的经度地带性和纬度地带性，表现为西段多于东段，北坡多于南坡。马宵华等[15]研究了天山北麓降水量和气温，指出未来一段时间内，该地区气温和降水量均呈上升趋势。刘友存等[16]探究了天山山区降水量对全球气候变化的响应。秦艳等[17]对 2001—2015 年天山山区积雪覆盖面积和频率的时空变化特征及其与温度和降水量的关系进行了研究。

然而，气候变暖不仅导致了降水量的变化，而且也影响了不同形态降水在总降水中的比例。孙燕等[18]分析了华东地区冬季不同降水形态的时空分布规律，结果表明，华东地区雨雪分界线位于 29°N、120°E 附近，分界线的西北区主要表现为降雪，东南

①　**收稿日期：**2019－06－04；　**修订日期：**2019－09－13
基金项目：国家自然科学基金项目(41761014)；兰州交通大学"百名青年优秀人才培养计划"；兰州交通大学(201806)优秀平台支持
作者简介：田亚林(1993－)，女，硕士研究生，研究方向为气候变化与水文水资源. E-mail：tianqibaby@163.com
通讯作者：李雪梅. E-mail：shuimingren@163.com

ChinaXiv合作期刊

区主要表现为降雨。刘原峰等[19]对黄土高原不同降水形态时空变化特点进行了研究,发现该地区雨雪分界线位于 35°N 附近,以北区域主要表现为降雪,以南且 110°E 以西的区域主要表现为降雨,雨夹雪多发生在分界线附近。韩熠哲等[20]研究发现,青藏高原年降水量呈增加趋势,年降水日数却随时间变化而减少。杨晓玲等[21]揭示了河西走廊东部雨、雪日的空间变化规律为自东北向西南增加。

高寒山区的一些气象站点,一般只观测降水量,而不区分降水形态,而降水形态的识别对于水文模型在高寒山区的应用极为重要[22]。因此,要进行不同形态降水的研究,就要先分离降水形态。当前,国内有关降水形态分离的研究相对较少,且多数水文模型采用临界气温法对降水形态进行识别。韩春坛等[23]通过比较单临界气温法和双临界气温法,指出双临界气温法在我国大部分地区不可用,单临界气温法更简便,精度更高,但在高海拔地区忽略的极端个例较多。张雪婷等[24]应用频率求交法和概率保证法并结合海拔高程,指出天山山区固液态降水分离的阈值温度为 1.36 ~ 5.48 ℃。DING 等[25]以湿球温度、相对湿度、气压和高程等为基础,提出了判别降水形态的参数化方案。本文拟采用该方法对天山山区降水形态进行分离识别。

天山山区发生雾露霜、冻雨、冰雹等形态降水的概率较小,因此本文主要探讨 1980—2017 年(1980 年以前天山山区站点数据连续性较差)天山山区降水日数、降雨日数、降雪日数及雨夹雪日数的时空分布特征及变化趋势,这不仅能够反映全球气候变化背景下的区域响应,也对该地区生态可持续发展、气象预报、灾害监测等具有重要的现实意义。

1 研究区概况

天山山脉横跨亚欧大陆,是亚洲中部最大的山系。习惯上将我国境内的天山称为东天山,中亚地区的天山称为西天山。东天山西起中国与吉尔吉斯斯坦边界,东至哈密市以东的星星峡戈壁,横亘新疆全境,长约 1 700 km,宽为 250 ~ 350 km,占天山山系总长度的 2/3 以上[26]。天山山区降水主要受地形和西风环流的影响,时空分布极不均匀,降水量呈现“北多南少,西多东少”的空间分布格局,且近年来呈增加态势,年内分配差异明显[12-13,16]。

2 数据与方法

2.1 数据

本文数据来源于中国气象局国家气象信息中心,选用数据为新疆天山山区 35 个气象站点(图 1) 1980—2017 年逐日降水、气温、气压、相对湿度及各气象站点高程数据。文中降雨日数为日降雨量大于等于 0.1 mm 的天数,降雪日数、雨夹雪日数同理,降水日数为 3 种降水形态日数之和。

2.2 方法

2.2.1 降水形态分离 DING 等[25]提出了用 1951—1979 年有降水形态的数据所拟合的参数关系式来识别降水形态的方法(雨、雪或雨夹雪)。该方法以湿球温度(T_w)为基础,当相对湿度大于 78% 时为双临界温度法,用以区分雨、雪和雨夹雪,相对湿度小于等于 78% 则为单临界温度法,区分雨和雪。在此基础上,根据经验函数计算临界温度,最后通过对湿球温度与临界温度(T_a、T_b)进行比较来判断此次降

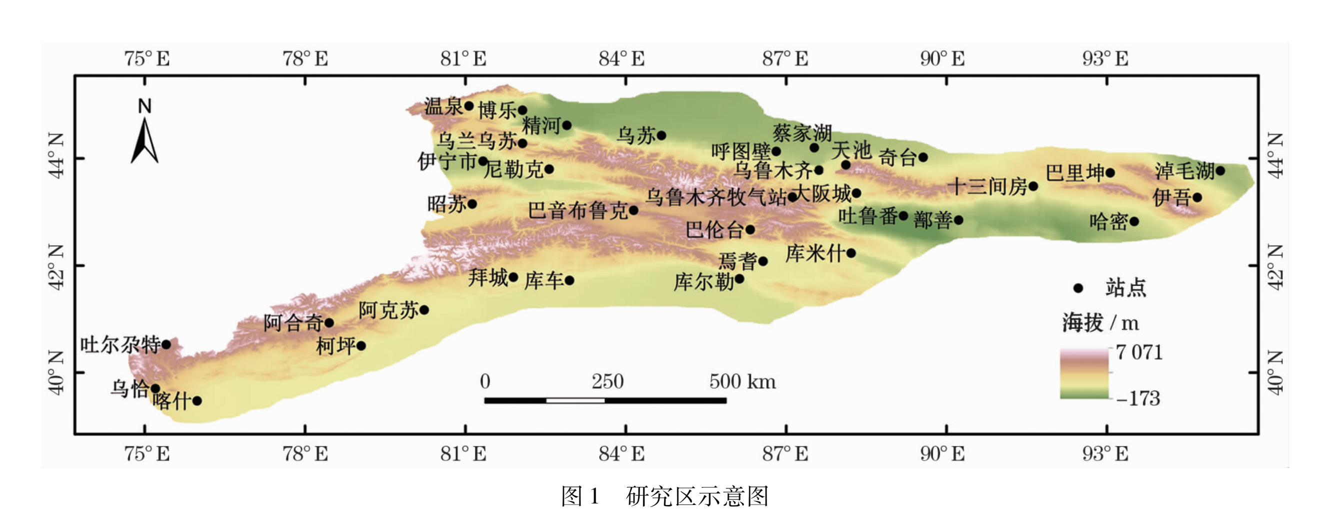


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Map of the study area

chinaXiv:202006.00028v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202006.00028v1

水事件的具体形态，即：

$$\text{降水类型} = \begin{cases} \text{雪} & T_w \leqslant T_a \\ \text{雨夹雪} & T_a < T_w < T_b \\ \text{雨} & T_w \geqslant T_b \end{cases}$$

其中，临界温度是与相对湿度、气温、气压和海拔有关的经验函数。DING 进一步研究表明，与其他分离降水形态的方法相比，该方法更符合我国的情况。本文将采用这种参数化方法对天山山区降水形态进行分离。

2.2.2 线性倾向估计法 线性变化趋势可用一元直线方程来描述[27-28]。用 x_i 表示样本量为 n 的某一气候变量，用 t_i 表示 x_i 对应的时间，建立 x_i 与 t_i 之间的一元线性回归方程：

$$x_i = a + b \times t_i \qquad (i = 1, 2, \cdots, n) \tag{1}$$

式中：a 为常数，b 由最小二乘法估计，$b \times 10$ 称为气候倾向率，代表每 10 a 不同降水形态日数上升或下降幅度的大小〔d·(10 a)$^{-1}$〕。

2.2.3 Mann-Kendall 突变检验与滑动 t 突变检验 Mann-Kendall(M-K)检验在水文和气象领域的趋势分析和突变检验中应用广泛[29]，它是一种非参数检验方法[30]，不要求样本数据服从一定分布，也不会受到少数极端或异常值的干扰，具有计算简便，检验范围广的优点。

M-K 突变检验法中，对于 n 个样本量的时间序列 x，构造秩序列：

$$S_k = \sum_{i=1}^{k} r_i \qquad (k = 2, 3, \cdots, n) \tag{2}$$

$$r_i = \begin{cases} +1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leqslant x_j \end{cases} \qquad (1 < j < i < n) \tag{3}$$

可见，秩序列 S_k 为第 i 时刻数值大于 j 时刻值个数的累计值。在时间序列随机独立的假设下，定义统计量：

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{Var(S_k)}} \tag{4}$$

式中：$E(S_k)$、$\sqrt{Var(S_k)}$ 分别为 S_k 的均值和方差。

将时间序列 x 逆序，并使：

$$\begin{cases} UB_k = -UF_k \\ k = n + 1 - k \end{cases} \qquad (k = 1, 2, \cdots, n) \tag{5}$$

在 M-K 突变检验法中，如果 UF_k(正统计量序列曲线)和 UB_k(逆统计量序列曲线)相交，且交点位于两条置信水平线之间，那么交点对应时刻就是突变开始时刻。

滑动 t 检验也是常用检验突变点的方法[30]。其基本思想是把某一气候序列中两端子序列均值有无显著差异看为来自 2 个总体均值有无显著差异的问题来进行检验。如果两端子序列的均值差异超过了一定的显著性水平，就认为发生了突变。这种方法主要根据 t 统计量曲线上的点是否超过显著性水平(t_α)来判断序列是否出现突变。

在本文中，M-K 突变检验在进行降雪和雨夹雪检测时出现了多个交点，有些点并不是突变点，因此，可结合滑动 t 对天山山区降水形态的突变年份进行判断[31]。M-K 检测出来的交点，若在滑动 t 检验中该点的 t 统计量超过了 $t_\alpha(\alpha = 0.05)$，则认为该点发生了显著突变，反之，说明突变并不明显。

2.2.4 Morlet 小波分析 Morlet 小波是常用的小波函数之一，它可以识别时间序列在不同时间尺度的周期变化及其在时间域中的分布[32-34]。对于任意函数 $f(t) \in L^2(R)$ 的连续小波变换为：

$$\begin{aligned} W_f(a,b) &= |a|^{-\frac{1}{2}} f(t)\, \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \\ &= \left\{ f(t), \psi_{a,b}(t) \right\} \end{aligned} \tag{6}$$

式中：$W_f(a,b)$ 为小波变换系数；a 为尺度因子，反映小波的周期长度；b 为平移因子，反映时间上的平移；$\psi_{a,b}(t)$ 是由 $\psi(t)$ 伸缩平移形成的一簇函数，称为连续小波；$\bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 为 $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 的复共轭函数；dt 为时间 t 的微分。将小波系数的平方值在 b 域上积分，可得到小波方差。

$$Var(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a,b)|^2 db \tag{7}$$

小波方差能反映信号波动的能量随时间尺度的分布，从而能确定时间序列中的主要周期尺度。

3 结果与分析

3.1 天山山区降水形态空间分布特征

1980—2017 年天山山区 35 个气象站点年均降水日数、降雨日数、降雪日数和雨夹雪日数的空间分布如图 2 所示。从总降水日数空间分布(图 2a)来看，天山山区年均降水日数差异较大，年最大降水日数为 140.4 d，年最小降水日数为 13.1 d，北坡降水日数(67.3 d)和西段降水日数(60.5 d)明显多于南

ChinaXiv合作期刊

坡(55.1 d)和东段(46.2 d)。总体上,天山山区总降水日数呈现“北多南少、西多东少”的空间分布格局,与天山山区年降水量的分布情况一致[13-14,16]。伊犁河流域的昭苏不仅降水量为全疆之冠[11],降水日数也最多。吐—哈盆地降水日数稀少,这与张正勇等[14]研究天山年降水量时提出的两中心相吻合,伊犁河谷为降水“高中心”,吐—哈盆地为降水“低中心”。

从图 2b 可知,天山山区北坡年均降雨日数为 42.6 d,南坡为 41.6 d,西段为 41.3 d,东段为 40.7 d,呈“北多南少,西多东少”的分布规律,与年降水日数的空间分布基本一致,说明降雨是天山山区降水的主要形态。其中,年均最大降雨日数也出现在昭苏,为 93.5 d。吐鲁番、淖毛湖年均降雨日数最少,分别为 10.8 d、10.0 d。

图 2c 中可以看出,天山南坡降雪日数(24.6 d)明显少于北坡(37.5 d)。降雪日数的高值区位于乌鲁木齐、巴音布鲁克及昭苏,西段的吐尔奈特年均降雪日数最多,为 76.9 d,降雪日数的低值区出现在东段的鄯善、十三间房和吐鲁番,年均降雪日数不足 3 d。此外,东段的巴里坤附近年降雪日数相对较多,为 37.5 d。

天山山区雨夹雪日数较少(图 2d),其中,北坡的尼勒克、昭苏、伊宁市为高值区,年均雨夹雪日数大于 3 d。天山东段的十三间房、淖毛湖近 38 a 未发生雨夹雪。

3.2 天山山区降水形态空间分布变化特征

在对天山山区年均降水日数及 3 种降水形态日数空间分布特征进行分析后,利用线性倾向估计法计算了 1980—2017 年天山山区各站点降水日数及 3 种降水形态日数的线性倾向率,其空间分布如图 3 所示。

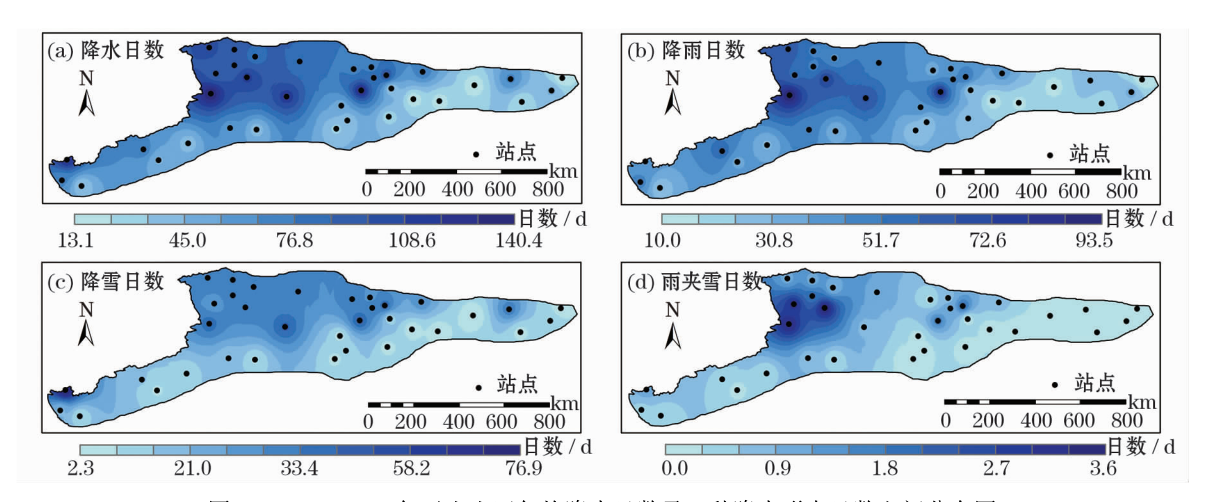


图 2 1980—2017 年天山山区年均降水日数及 3 种降水形态日数空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of DOP, DOR, DOSN and DOSL in Tianshan mountainous area during 1980 – 2017

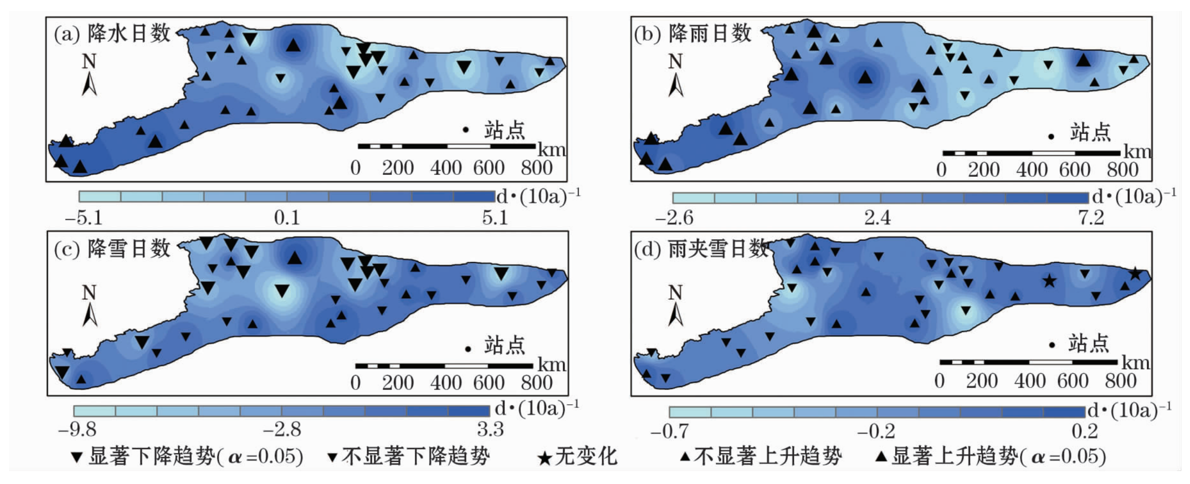


图 3 1980—2017 年天山山区年均降水日数及 3 种降水形态日数倾向率空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution of tendency rates of DOP, DOR, DOSN and DOSL in Tianshan mountainous area during 1980 – 2017

chinaXiv:202006.00028v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202006.00028v1

图3显示,天山山区年均降水形态日数倾向率存在明显的地区差异。由图3a可知,天山山区大部分站点近38 a降水日数呈增多趋势,占总站点数的60%,其中,西段、东段、北坡、南坡降水日数倾向率分别为2.8 d·(10 a)$^{-1}$、1.6 d·(10 a)$^{-1}$、0.9 d·(10 a)$^{-1}$和0.4 d·(10 a)$^{-1}$,呈现"西段快于东段,北坡快于南坡"特征,与刘友存等[16]提出的天山年降水量变化率的空间分布一致。最大降水日数增多中心位于乌苏,为5.1 d·(10 a)$^{-1}$,而西段是降水日数增幅最大的区域,同时,该地区也是降水量增幅最大的地区[35]。这表明,天山山区年降水日数与降水量的空间变化趋势一致,即降水量增幅大的区域,降水日数的增长趋势也大。

就降雨日数而言(图3b),近38 a天山山区降雨日数表现为增加趋势,35个站点中有28个呈增加趋势,其中,12个站点通过了0.05显著性检验,且西段增长速度[3.9 d·(10 a)$^{-1}$]明显大于东段[2.9 d·(10 a)$^{-1}$],北坡[2.6 d·(10 a)$^{-1}$]大于南坡[2.5 d·(10 a)$^{-1}$],东段少数地区略有减少。巴音布鲁克增速最快,为7.2 d·(10 a)$^{-1}$,天山西段及东段巴里坤地区降雨日数增长较快,均大于5 d·(10 a)$^{-1}$。

对于降雪日数(图3c),1980—2017年天山山区35个气象站点中,有27个站点呈减少趋势,其中,14个站点通过了0.05显著性检验。降雪日数倾向率为-2.2 d·(10 a)$^{-1}$,这表明天山山区降雪日数总体呈减少趋势,其中,巴音布鲁克、巴里坤降雪日数减少最为明显,分别为-9.8 d·(10 a)$^{-1}$、-6.3 d·(10 a)$^{-1}$。仅乌苏、焉耆等少数地区降雪日数呈明显增加趋势,分别为3.3 d·(10 a)$^{-1}$、1.8 d·(10 a)$^{-1}$。

近38 a天山山区雨夹雪日数变化不明显(图3d),乌兰乌苏增长最快,为0.2 d·(10 a)$^{-1}$,而昭苏、库米什减少最多,分别为-0.6 d·(10 a)$^{-1}$、-0.7 d·(10 a)$^{-1}$。

3.3 天山山区降水形态年内分布规律

图4为天山山区1980—2017年降水日数及3种降水形态日数年内变化曲线。由图可见,天山山区各种降水形态日数年内分配不均,年降水日、雨日和雪日年内变化差异明显。年降水集中在4~9月,主要降水形式为降雨,然后向两端递减,同时,该时期也是雨夹雪和降雪的低发期。1~3月、11~12月雨日很少,降雪为该时期的主要降水形态。10~11月和3~4月则是降雨、雨夹雪和降雪3种降水形态共存。7月降水日数最多,为9 d,主要表现形式为降雨。11月降水日数最少,为3.7 d,主要表现为降雪。

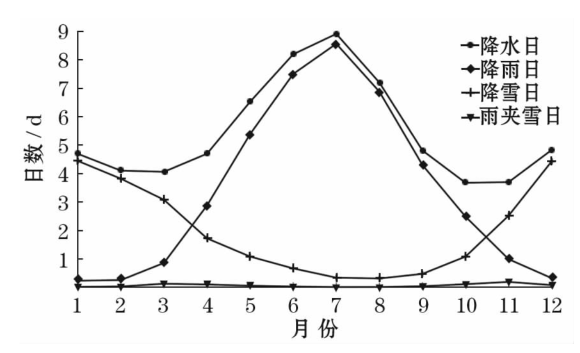


图4 1980—2017年天山山区降水日数及3种降水形态日数年内变化曲线

Fig.4 Monthly variation of DOP, DOR, DOSN and DOSL in Tianshan mountainous area during 1980-2017

3.4 天山山区降水形态年际变化规律

3.4.1 趋势性规律 计算天山山区近38 a年均降水日及各降水形态的日数,得到它们的年际变化曲线如图5。由图5a可知,近38 a天山山区年降水日数的变化范围为50~78 d,线性倾向率为0.2 d·(10 a)$^{-1}$,呈微弱增加趋势。降水多发年为2003年,为78 d,其次为1998年,为75 d,1997年降水日数最少,为50 d。与袁玉江等[36]提到的天山山区年降水量最多的年份为1998年,最少年为1997年大致对应,也与以往多数研究得到的天山山区年降水量呈增多趋势研究结论一致[11-14]。

天山山区年均降雨日数增长显著(图5b),增长率为2.4 d·(10 a)$^{-1}$。2005年平均降雨日数高达68 d,1986年平均降雨日数为20 d。2004—2008年是降雨多发年,1985—1992年为降雨少发年,2010年以后降雨日数平缓。

天山山区近38 a年均降雪日数呈显著减少趋势(图5c),倾向率为-2.1 d·(10 a)$^{-1}$。1986年平均降雪日数高达40 d,2005年降雪日数只有5 d。1986—1992年是降雪多发年,2006—2010年是降雪少发年。

天山山区雨夹雪日数无显著变化趋势(图5d),其中,1987年和2004年是天山山区平均雨夹雪日数的两个多发年,平均雨夹雪日数分别为2 d和1.5 d。2005年该地区未出现雨夹雪天气。

3.4.2 突变性分析 对1980—2017年天山山区降水日数及不同降水形态日数进行M-K突变检验,得

ChinaXiv合作期刊

到图 6 曲线。从降水日数的 M-K 检验结果(图 6a)来看,*UF* 和 *UB* 交点出现在 1986 年、2012 年和 2015 年,5 a 滑动 *t* 检验的结果(表 1)显示,1986 年为降水日数的突变年,由此,我们认为天山山区降水日数的突变发生在 1986 年。图 6b 为降雨日数的 M-K 检验结果图,降雨日数的两条检验曲线在 1995 年附近相交,而 5 a 滑动 *t* 检验的结果显示,1995 年并没有发生显著突变,而在 1986 年发生了显著性突变,2 种检验方法得到的突变年份并不一致,这说明天山山区降雨日数突变并不明显。降雪日数的 *UF* 曲线和 *UB* 曲线在 1996—1998 年及 2004—2011 年间有多个交点(图 6c),而滑动 *t* 检验结果显示,降雪日数在 2012 年发生了显著突变,并不在 M-K 检验结果的交点区间内。因此,我们认为近 38 a天山

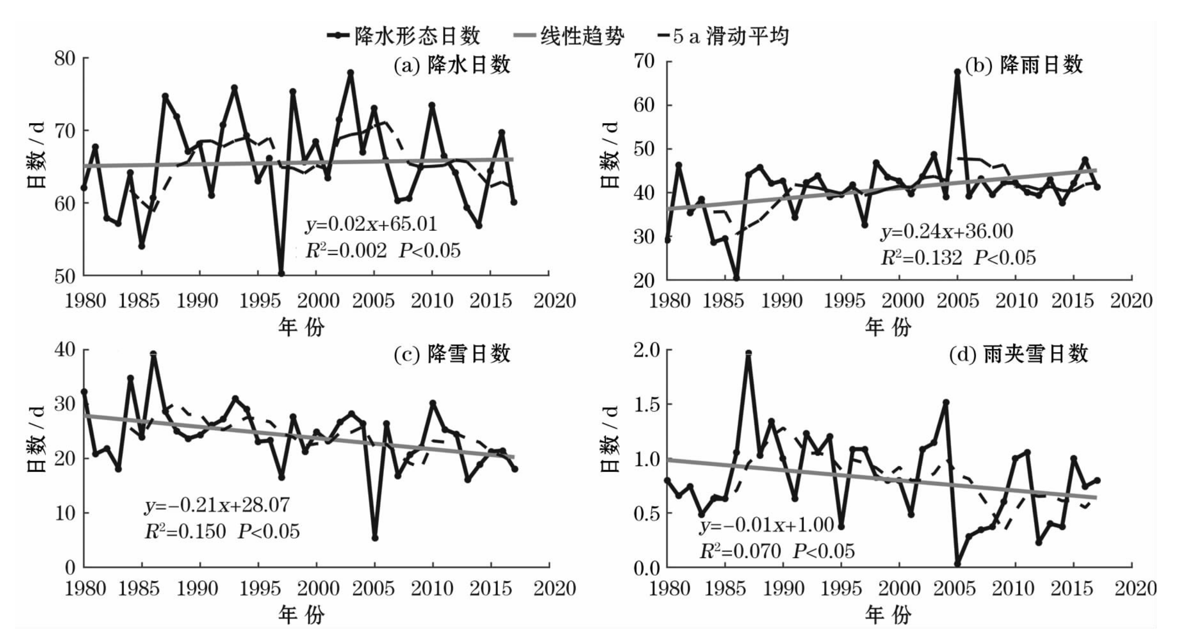


图 5 1980—2017 年天山山区年均降水日数及 3 种形态降水日数年际变化图

Fig. 5 Inter-annual variation of DOP, DOR, DOSN and DOSL in Tianshan mountainous area during 1980 – 2017

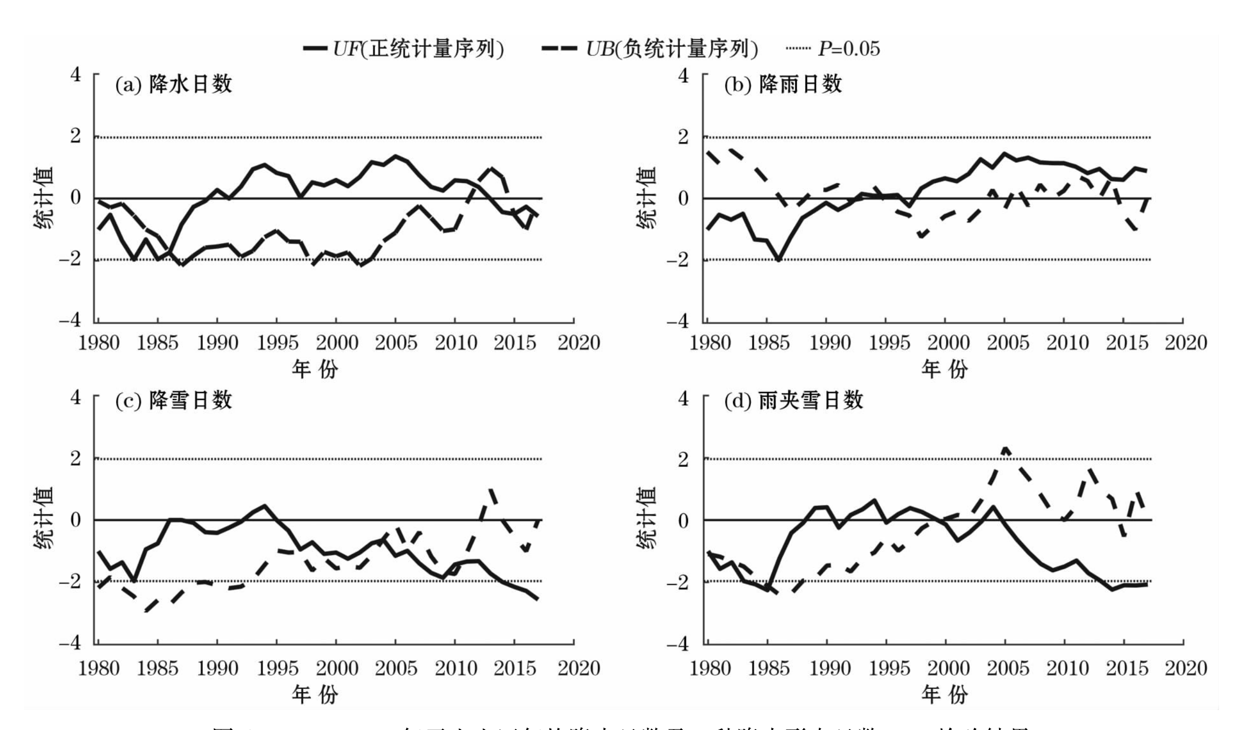


图 6 1980—2017 年天山山区年均降水日数及 3 种降水形态日数 M-K 检验结果

Fig. 6 Mann-Kendall test of DOP, DOR, DOSN and DOSL in Tianshan mountainous area during 1980 – 2017

chinaXiv:202006.00028v1

ChinaXiv合作期刊

表 1　1980—2017 年天山山区年均降水日数及 3 种降水形态日数滑动 *t* 检验

Tab. 1　Moving *t*-test of DOP, DOR, DOSN and DOSL in Tianshan mountainous area during 1980 – 2017

降水类型	初始变点	统计量 t 值	临界 $t_{\alpha/2}(\alpha=0.05)$	是否显著
降水日数	1986	–3.04	2.31	显著
降雨日数	1986	–2.74	2.31	显著
降雪日数	2012	2.52	2.31	显著
雨夹雪日数	1985	–3.10	2.31	显著
	2004	3.11	2.31	显著

山区降雪日数并没有发生明显突变。由雨夹雪日数的 M-K 检验结果图可知(图 6d),雨夹雪日数在 1985 年和 2000 年前后发生了突变,5 a 滑动 t 检验结果也表明,1985 年为天山山区雨夹雪日数的突变年,2 种检验结果相差不大。综上,本文认为 1986 年前后为天山山区降水日数突变年,此外,降雨日数在 1986 年和 1995 年,降雪日数在 2012 年,雨夹雪日数在 1985 年和 2004 年也发生了不显著突变。这与普宗朝等[37]提出的 1986 年为天山山区年降水量增多的突变年,刘波等[38]认为新疆地区年降水量在 1987 年发生转折性变化的结论相对一致。

3.4.3　周期性规律　选用 Morlet 小波对天山山区近 38 a 降水日数及 3 种降水形态日数进行分析,得到图 7 所示的小波系数实部等值线及对应的方差图。

从图 7a 中可以看出,天山山区年降水日数存在 18 ~ 24 a,8 ~ 12 a,3 ~ 5 a 和 9 ~ 15 a 的变化周期,这些周期的小波方差极值出现在 22 a、9 a、4 a 和 11 a。其中,18 ~ 24 a 尺度上出现了少—多交替的准两次半震荡,表现较为稳定,贯穿全时间序列。2007 年前后,8 ~ 12 a 的周期变为 9 ~ 15 a。张代青等[39]研究发现西北地区降水量存在 20 a、9 a、4 a 和 2 a 左右周期,与前面分析的降水日数的周期相对一致,这也表明天山山区降水日数与降水量具有一致性。

由图 7b 可知,天山山区年降雨日数在 18 ~ 24 a 时间尺度上的周期振荡明显,是天山山区降雨日数的主导周期,8 ~ 9 a 的变化周期也贯穿其中。此外,还存在 3 ~ 4 a 的振荡周期。这些周期对应的中心时间尺度分别为 20 a、9 a 和 4 a。降雨日数呈现出与降水日数相似的变化周期,这进一步表明降雨是天山山区的主要降水形态。

降雪日数在 11 ~ 13 a 尺度的振荡明显(图 7c),中心时间尺度为 11 a 左右,贯穿始终,该周期的波动影响着天山山区年降雪日数在整个时间序列内的变化周期。与李效收等[40]分析得到的新疆降雪日数有 11 a 左右的周期一致。在 1998—2010 年,还存在 6 a 左右的周期。此外,降雪日数还有 3 a 左右的小尺度周期。

天山山区雨夹雪日数的变化周期为 8 ~ 12 a 及 18 ~ 22 a(图 7d),对应的中心尺度为 11 a 和 20 a。其中, 8 ~ 12 a 为第一主周期,另外,18 ~ 22 a 周期变化较为明显,且贯穿整个时间序列。同时,还存在

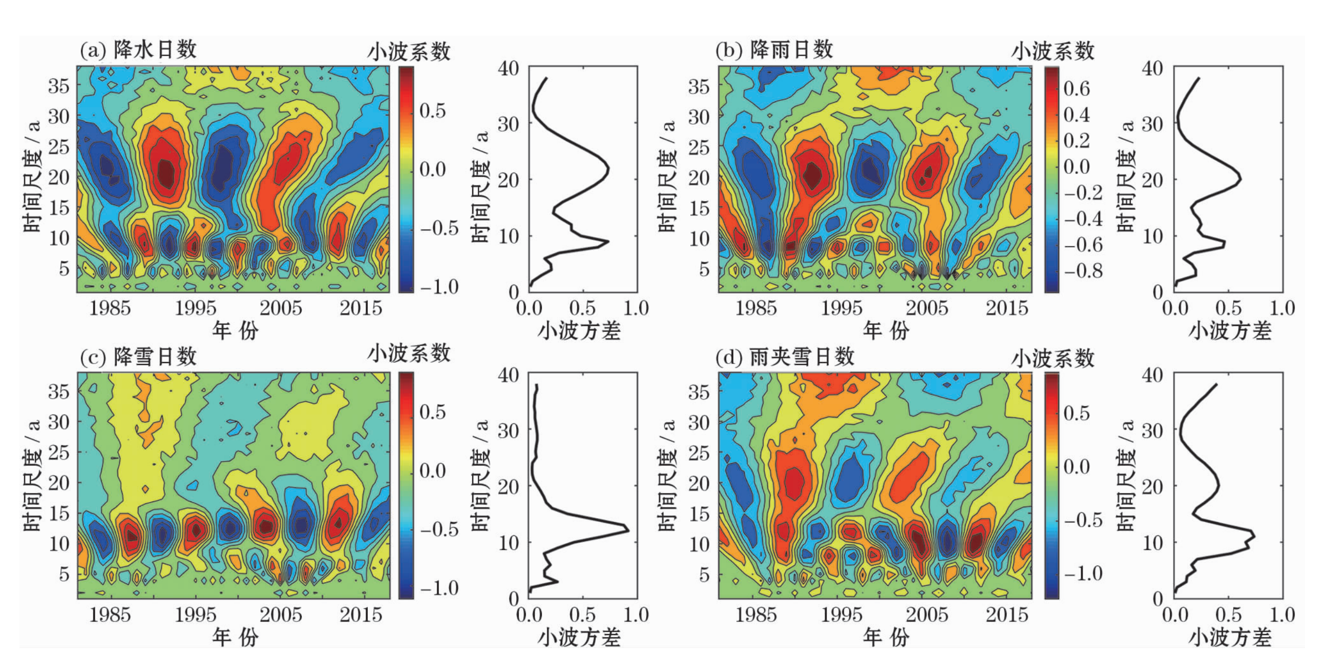


图 7　1980—2017 年天山山区年均降水日数及 3 种降水形态日数小波分析图

Fig. 7　Wavelet analysis of DOP, DOR, DOSN and DOSL in Tianshan mountainous area during 1980 – 2017

chinaXiv:202006.00028v1

ChinaXiv合作期刊

5 a 和 3 a 左右的小周期。

综上,天山山区降水日数及各降水形态日数都存在 10 a 左右的振荡周期。此外,降水日数、降雨日数和雨夹雪日数 20 a 左右的周期振荡也比较明显。

4 结 论

本文以 1980—2017 年天山山区 35 个气象站点逐日降水资料为基础,进行降水形态识别分离后,运用线性倾向估计、M-K 突变检验、滑动 t 突变检验、Morlet 小波分析等方法,分析了过去 38 a 天山山区降水日数、降雨日数、降雪日数及雨夹雪日数的时空分布规律,得到了以下结论:

(1)空间上,天山山区年降水日数呈现"北多南少,西多东少"的分布特征,这与天山山区降水量的空间分布一致。降水日数最多的站点是昭苏,年降雨日数最多处位于昭苏和乌鲁木齐,降雪日数最多点为吐尔尕特和乌鲁木齐,尼勒克与昭苏雨夹雪日数最多;降水形态日数空间变化呈"西快东慢,北快南慢"的增长趋势,西段增加趋势明显,降雨日普遍增多,大部分地区降雪日减少,雨夹雪日也有减少趋势。

(2)从年内变化来看,天山山区降水集中在 4 ~ 9 月,主要表现为降雨,降雪在 11 月 ~ 翌年 3 月较多,3 ~4 月及 10 ~11 月时,3 种形态的降水共存;从年际变化来看,天山山区年降水日数增长缓慢,倾向率为 $0.2\ d \cdot (10\ a)^{-1}$,降雨日数增加趋势显著,倾向率为 $2.4\ d \cdot (10\ a)^{-1}$,降雪日数表现为显著减少趋势,倾向率为 $-2.1\ d \cdot (10\ a)^{-1}$,雨夹雪日数无明显变化。

(3)从天山山区总降水日数及各降水形态日数的 M-K 突变检验结合 5 a 滑动 t 检验结果来看,天山山区降水日数和雨夹雪日数在 1986 年前后发生了显著突变,此外,降雨日数在 1986 年和 1995 年,降雪日数在 2012 年,雨夹雪日数在 1985 年和 2004 年也发生了不显著突变。

(4)天山山区年降水日数及 3 种降水形态日数具有周期性特征,降水日数、降雨日数、降雪日数和雨夹雪日数均存在 10 a 左右的振荡周期,此外,降水日、降雨日和雨夹雪日在 18 ~22 a 尺度的周期波动也比较明显。

综上所述,天山山区降水日数与降水量时空分布及变化具有相对一致性。已有的研究[41]表明,天山山区降雨量和降雪量呈现增长趋势,极端降水强度也呈上升趋势[42]。但是,对于具体的降水形态(降雨、降雪及雨夹雪)而言,并未结合降水强度做进一步探究。此外,天山山区属高寒地区,降水复杂多变,且该地区气象站点稀少,数据连续性较差,这在一定程度上会影响样本质量,进而影响研究结果,这也是当前研究天山山区降水所面临的主要问题。

参考文献(References)

[1] 田莉娟,薛丽芳,杨芳. 近 60 a 来南四湖流域降水变化特征分析[J]. 水土保持研究,2018,25(2):201 - 206. [TIAN Lijuan, XUE Lifang, YANG Fang. Variability of precipitation in Nansi Lake Basin in recent 60 years[J]. Research of Soil and Water Conservation,2018,25(2):201 - 206.]

[2] 徐泽华,韩美,张广彩,等. 山东降水时空分布变化及其影响因素[J]. 水土保持研究,2018,25(3):272 - 278. [XU Zehua, HAN Mei, ZHANG Guangcai, et al. Spatiotemporal distribution of the precipitation and its impact factors in Shandong Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(3):272 - 278.]

[3] YE K H, WU R G. Autumn snow cover variability over northern Eurasia and roles of atmospheric circulation[J]. Advances in Atmospheric Sciences,2017,34(7):847 - 858.

[4] BOX J E, FETTWEIS X, STROEVE J C, et al. Greenland ice sheet albedo feedback: Thermodynamics and atmospheric drivers[J]. The Cryosphere,2012,6(4):821 - 839.

[5] DENG H J, PEPIN N C, CHEN Y N. Changes of snowfall under warming in the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,2017,122(14):7323 - 7341.

[6] 龙柯吉,郭旭,陈朝平,等. 四川省降水相态时空分布及变化特征[J]. 高原山地气象研究,2015,35(1):21 - 26. [LONG Keji, GUO Xu, CHEN Chaoping, et al. The spatial-temporal distribution and change characteristics of precipitation-phase in Sichuan[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2015, 35(1):21 - 26.]

[7] 施雅风. 中国西北气候由暖干向暖湿转型问题评估[M]. 北京:气象出版社,2003:124 - 125. [SHI Yafeng. An assessment of the issues of climatic shift from warm-dry to warm-wet in northwest China [M]. Beijing: China Meteorological Press,2003:124 - 125.]

[8] 靳立亚,符娇兰,陈发虎. 近 44 a 来中国西北降水量变化的区域差异以及对全球变暖的响应[J]. 地理科学,2005,25(5):567 - 572. [JIN Liya, FU Jiaolan, CHEN Fahu. Spatial differences of precipitation over northwest China during the last 44 years and its response to global warming[J]. Scientia Geographica Sinica, 2005,25(5):567 - 572.]

chinaXiv:202006.00028v1

ChinaXiv合作期刊

[9] 辛宏,张明军,李瑞雪,等. 近 50 a 中国天山日照时数变化及其影响因素[J]. 干旱区研究,2011,28(3):485 – 491. [XIN Hong,ZHANG Mingjun,LI Ruixue,et al. Analysis on the change of sunshine duration and its affecting factors in the Tianshan mountainous in recent 50 years[J]. Arid Zone Research,2011,28(3):485 – 491.]

[10] 蓝永超,吴素芬,钟英君,等. 近 50 a 来新疆天山山区水循环要素的变化特征与趋势[J]. 山地学报,2007,25(2):177 – 183. [LAN Yongchao,WU Sufen,ZHONG Yingjun,et al. Characteristics and trends of changes on water cycle factors in the Tianshan mountainous area since 1960s[J]. Journal of Mountain Science,2007,25(2):177 – 183.]

[11] 赵传成,丁永建,叶柏生,等. 天山山区降水量的空间分布及其估算方法[J]. 水科学进展,2011,22(3):315 – 322. [ZHAO Chuancheng,DING Yongjian,YE Baisheng,et al. Spatial distribution of precipitation in Tianshan Mountains and its estimation[J]. Advances in Water Science,2011,22(3):315 – 322.]

[12] 韩雪云,杨青,姚俊强. 新疆天山山区近 51 a 来降水变化特征[J]. 水土保持研究,2013,20(2):139 – 144. [HAN Xueyun,YANG Qing,YAO Junqiang. Spatiotemporal distribution characteristics of precipitation in Tianshan Mountain of Xinjiang during the last 51 years[J]. Research of Soil and Water Conservation,2013,20(2):139 – 144.]

[13] 张正勇,刘琳,唐湘玲. 近 50 a 我国天山山区降水变化区域差异及突变特征[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(7):85 – 90. [ZHANG Zhengyong, LIU Lin, TANG Xiangling. The regional difference and catastrophe of precipitation change in Tianshan Mountains in recent 50 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2013,27(7):85 – 90.]

[14] 张正勇,何新林,刘琳,等. 中国天山山区降水空间分布模拟及成因分析[J]. 水科学进展,2015,26(4):500 – 508. [ZHANG Zhengyong,HE Xinlin,LIU Lin,et al. Spatial distribution of rainfall simulation and the cause analysis in China's Tianshan Mountains area[J]. Advances in Water Science,2015,26(4):500 – 508.]

[15] 马宵华,韩炜,党亚玲,等. 1960—2014 年天山北麓气温和降水变化趋势及预测研究[J]. 环境科学与管理,2017,42(9):48 – 52. [MA Xiaohua,HAN Wei,DANG Yaling,et al. Trend and prediction of temperature and precipitation in northern piedmont of Tianshan Mountains in 1960 – 2014[J]. Environment Science and Management,2017,42(9):48 – 52.]

[16] 刘友存,焦克勤,赵奎,等. 中国天山地区降水对全球气候变化的响应[J],冰川冻土,2017,39(4):748 – 759. [LIU Youcun, JIAO Keqin, ZHAO Kui, et al. The response of precipitation to global climate change in the Tianshan Mountains, China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2017,39(4):748 – 759.]

[17] 秦艳,丁建丽,赵求东,等. 2001—2015 年天山山区积雪时空变化及其与温度和降水的关系[J]. 冰川冻土,2018,40(2):249 – 260. [QIN Yan,DING Jianli,ZHAO Qiudong,et al. Spatial-temporal variation of snow cover in the Tianshan Mountains from 2001 to 2015,and its relation to temperature and precipitation[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2018,40(2):249 – 260.]

[18] 孙燕,尹东屏,顾沛澎,等. 华东地区冬季不同降水相态的时空变化特征[J]. 地理科学,2014,34(3): 370 – 376. [SUN Yan, YIN Dongpin, GU Peipeng, et al. The spatial and temporal variations of different precipitation phases in eastern China during winter[J]. Scientia Geographica Sinica,2014,34(3):370 – 376.]

[19] 刘原峰,朱国锋,赵军,等. 黄土高原区不同降水相态的时空变化[J]. 地理科学,2016,36(8): 1227 – 1233. [LIU Yuanfeng, ZHU Guofeng,ZHAO Jun,et al. Spatial and temporal variation of different precipitation type in the Loess Plateau area[J]. Scientia Geographica Sinica,2016,36(8):1227 – 1233.]

[20] 韩熠哲,马伟强,王炳赟,等. 青藏高原近 30 a 降水变化特征分析[J]. 高原气象,2017,36(6):1477 – 1486. [HAN Yizhe,MA Weiqiang,WANG Bingyun,et al. Climatic characteristics of rainfall change over the Qinghai-Tibetan Plateau from 1980 to 2013[J]. Plateau Meteorology,2017,36(6):1477 – 1486.]

[21] 杨晓玲,汪宗成,杨梅,等. 河西走廊东部主要相态降水日的气候特征[J]. 干旱区研究,2018,35(2): 404 – 411. [YANG Xiaoling,WANG Zongcheng,YANG Mei,et al. Climatic characteristics of rainfall and snowfall days in the East Hexi Corridor[J]. Arid Zone Research,2018,35(2):404 – 411.]

[22] 白磊,李兰海,师春香,等. 中国天山山区降水特征及其研究进展[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2017,38(5):38 – 48. [BAI Lei,LI Lanhai,SHI Chunxiang,et al. An overview of precipitation characteristics and its research progress in Tianshan Mountains area,China [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition),2017,38(5):38 – 48.]

[23] 韩春坛,陈仁升,刘俊峰,等. 固液降水分离方法探讨[J]. 冰川冻土,2010,32(2):249 – 256. [HAN Chuntan,CHEN Rensheng, LIU Junfeng,et al. A discuss of the separating solid and liquid precipitations[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2010,32(2):249 – 256.]

[24] 张雪婷,李雪梅,高培,等. 基于不同方法的中国天山山区降水形态分离研究[J]. 冰川冻土,2017,39(2):235 – 244. [ZHANG Xueting,LI Xuemei,GAO Pei,et al. Separation of precipitation forms based on different methods in Tianshan mountainous area,northwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2017,39(2):235 – 244.]

[25] DING B H,YANG K,QIN J,et al. The dependence of precipitation types on surface elevation and meteorological conditions and its parameterization[J]. Journal of Hydrology,2014,513:154 – 163.

[26] 胡汝骥. 中国天山自然地理[M]. 北京:中国环境科学出版社,2004:2 – 4. [HU Ruji. Physical geography of the Tianshan Mountains in China[M]. Beijing:China Environmental Science Press,2004:2 – 4.]

[27] 刘斌涛,陶和平,宋春风,等. 1960—2009 年中国降雨侵蚀力的时空变化趋势[J],地理研究,2013,32(2):245 – 256. [LIU Bintao,TAO Heping,SONG Chunfeng,et al. Temporal and spatial

chinaXiv:202006.00028v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202006.00028v1

variations of rainfall erosivity in China during 1960 to 2009[J]. Geographical Research,2013,32(2):245 – 256.]

[28] 史佳良,王秀茹,李淑芳,等. 近 50 a 来河南省气温和降水时空分布变化特征分析[J]. 水土保持研究,2017,24(3):151 – 156. [SHI Jialiang, WANG Xiuru, LI Shufang, et al. Variation characteristics of air temperature and precipitation in Henan Province in recent 50 years[J]. Research of Soil and Water Conservation,2017,24(3):151 – 156.]

[29] 何庆龙,周维博,夏伟,等. 延安市近 60 a 降水时空特征分析[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(1):31 – 37. [HE Qinglong,ZHOU Weibo,XIA Wei,et al. Spatial-temporal characteristics about precipitation of Yan'an City in the past 60 years[J]. Journal of Water Resources Water Engineering,2018,29(1):31 – 37.]

[30] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,2007:62 – 72. [WEI Fengying. Modern climatic statistical diagnosis and prediction technology[M]. Beijing:China Meteorological Press,2007:62 – 72.]

[31] 于泽兴,胡国华,陈肖,等. 近 45 a 来浏阳河流域极端降水变化[J]. 水土保持研究,2017,24(5):139 – 143. [YU Zexing,HU Guohua,CHEN Xiao,et al. Change in extreme precipitation in Liuyang River Basin during the past 45 years[J]. Research of Soil and Water Conservation,2017,24(5):139 – 143.]

[32] 郭玉娣,徐祥德,陈渭民,等. "鱼尾"状地形热力效应对天山降水系统及水资源的影响[J]. 高原气象,2014,33(5):1363 – 1373. [GUO Yudi,XU Xiangde,CHEN Weimin,et al. Heat source over 'Fishtail' type topography effects on Tianshan Mountain regions precipitation systems and water resources[J]. Plateau Meteorology,2014,33(5):1363 – 1373.]

[33] 张彦龙,刘普幸. 基于 AI 指数的新疆干湿时空变化及其影响因素分析[J]. 自然资源学报,2016,31(4):658 – 671. [ZHANG Yanlong,LIU Puxing. Study on temporal and spatial variation of the dry-wet and its influence factors in Xinjiang based on aridity index[J]. Journal of Natural Resources,2016,31(4):658 – 671.]

[34] 吴建峰,罗娜,张凤太,等. 基于 Morlet 小波分析的云贵高原区春季降水特征研究[J]. 中国农村水利水电,2018,(5):123 – 127. [WU Jianfeng,LUO Na,ZHANG Fengtai,et al. An analysis of spring precipitation in Guizhou Province based on Morlet wavelet method[J]. China Rural Water and Hydropower,2018,(5):123 – 127.]

[35] 施雅风,沈永平,胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初探[J]. 冰川冻土,2002,24(3):219 – 226. [SHI Yafeng,SHEN Yongping,HU Ruji. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in northwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2002,24(3):219 – 226.]

[36] 袁玉江,何清,喻树龙. 天山山区近 40 a 降水变化特征与南、北疆的比较[J]. 气象科学,2004,24(2): 220 – 225. [YUAN Yujiang, HE Qing, YU Shulong. Features of annual precipitation change in Tianshan mountainous area for the recent 40 years and comparison with those in the Southern and Northern Xinjiang[J]. Scientia Meteorological Sinica,2004,24(2):220 – 225.]

[37] 普宗朝,张山清,李景林,等. 近 36 a 新疆天山山区气候暖湿变化及其特征分析[J]. 干旱区地理,2008,31(3):409 – 415. [PU Zongchao,ZHANG Shanqing,LI Jinglin,et al. Facts and features of climate change into warmth and damp in the Tianshan Mountains area in the recent 36 years[J]. Arid Land Geography, 2008,31(3):409 – 415.]

[38] 刘波,冯锦明,马柱国,等. 1960—2005 年新疆气候变化的基本特征[J]. 气候与环境研究,2009,14(4):414 – 426. [LIU Bo, FENG Jinming,MA Zhuguo,et al. Characteristics of climate changes in Xinjiang from 1960 to 2005[J]. Climatic and Environmental Research,2009,14(4):414 – 426.]

[39] 张代青,梅东亚,杨娜,等. 中国大陆近 54 a 降水量变化规律的小波分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2010,43(3):278 – 287. [ZHANG Daiqing,MEI Yadong,YANG Na,et al. Wavelet analysis of change law of precipitations in China's mainland over the past 54 years[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2010, 43(3):278 – 287.]

[40] 李效收. 1961—2010 年新疆降雪的变化特征[D]. 兰州:西北师范大学,2013. [LI Xiaoshou. Changing characteristics of snowfall in Xinjiang from 1961 to 2010[D]. Lanzhou:Northwest Normal University,2013.]

[41] 张雪婷. 中国天山山区降水形态分离及降雪影响因素分析[D]. 兰州:兰州交通大学,2018. [ZHANG Xueting. Separation of precipitation forms and analysis of impact factors on snowfall in Tianshan mountainous area, northwest China [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University,2018.]

[42] 赵丽,杨青,韩雪云,等. 1961—2009 年新疆极端降水事件时空差异特征[J]. 中国沙漠,2014,34(2):550 – 557. [ZHAO Li, YANG Qing,HAN Xueyun,et al. Spatial and temporal differences of extreme precipitation during 1961 – 2009 in Xinjiang, China [J]. Journal of Desert Research,2014,34(2):550 – 557.]

ChinaXiv合作期刊

Spatial and temporal variations of different precipitation types in the Tianshan Mountains from 1980 to 2017

TIAN Ya-lin[1,2,3], LI Xue-mei[1,2,3], LI Zhen[4], QIN Qi-rui[1,2,3]

(1 *Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou* 730070, *Gansu*, *China*;

2 *National-Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring*, *Lanzhou* 730070, *Gansu*, *China*;

3 *Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring*, *Lanzhou* 730070, *Gansu*, *China*;

4 *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia*, *Beijing* 100029, *China*)

Abstract: Precipitation is a basic element of climate. Different precipitation types play different roles in the material and energy cycles of the land surface. As the planet warms, a climatic shift from warm-dry to warm-humid has taken place in the northwest region of China, especially in Xinjiang Province. The Tianshan Mountains function as the climatic dividing line between South Xinjiang and North Xinjiang. This area is very important to the sustainable development of the economy of Xinjiang, and to the central and western regions of China, more broadly. In response to global warming, precipitation types have begun to change in the Tianshan Mountains, and tracking these changes in the number of days with different precipitation types is an important step. We gathered daily precipitation data from 35 meteorological stations in the Tianshan Mountains from 1980 to 2017. We separated three main precipitation types (rain, snow, and sleet) and identified them using a parameterization scheme which performed better than other normal schemes. The spatial distribution of days with different precipitation types in the Tianshan Mountains was interpolated using the Inverse Distance Weighted method provided by ArcGIS 10.2. The linear trend rate was used to establish the trend in the days of precipitation types. Combining the Mann-Kendall mutation test with the moving *t*-test method, we isolated an abrupt change in the number of days with different precipitation types. Finally, we used morlet wavelet analysis to study the periodicity of the days of different precipitation types in the Tianshan Mountains. Our results showed that the precipitation days were relatively consistent with the amount of precipitation. (1) In terms of spatial patterns, days of precipitation, and days of rainfall were more common in the north and west than in the south and east. " Snowfall occurred on more days in the north and fewer in the south. " The increasing trend of days of precipitation in the north was more pronounced than it was in the south, as was the faster increasing trend in the west. The number of days of rainfall generally increased, while both snowfall and sleet became less common in most of the study areas. (2) Most precipitation in the Tianshan Mountains occurred during April-September, and it mainly comprised rainfall. Most snowfall occurred during November-March of the following year. All three forms of precipitation coexisted in March and April, and in October and November. Over the last 38 years, the number of days with precipitation, rain, and snowfall showed respective trends of gently increasing, significantly increasing, and decreasing. The changes in the number of days of sleet were not significant. (3) An abrupt inflection point occurred in the number of days with precipitation in the Tianshan Mountains was identified in around 1986. In addition, rainy days experienced an indistinctive mutation in 1986 and 1995; snow in 2012; and sleet in 1985 and 2004. (4) All four precipitation types experienced a fluctuating cycle change of about 10 years. Finally, the fluctuation cycles of the 18 – 22 – year scale for precipitation, rain, and sleet were also obvious.

Key words: Tianshan Mountains; precipitation types; spatiotemporal distribution

chinaXiv:202006.00028v1